

車輪・レール間の接触面形状を解析する

山本 大輔

車両構造技術研究部(車両振動 副主任研究員)



やまもと だいすけ

はじめに

鉄道は環境に優しい交通手段であると同時に、大量輸送を担う公共交通の一翼として、安全で快適性に優れた乗り物でなければなりません。近年、鉄道会社では走行安全性と乗り心地のさらなる向上を目指して様々な研究開発が行われています。例えば、新しい形式の台車を設計する時や車両の速度向上を図る場合などでは、いきなり実車で走行するのはコスト面、安全面から問題があります。そこで、計算機を用いた数値的な車両運動解析を活用することになります。車両の走行安定性や左右の乗り心地を調べるための数値解析モデルは「ばね-質点系モデル」で表現できることが一般的に知られており、車両の運動には車輪とレール間に働く力が大きな影響を与えることがわかっています。しかし、車輪とレール間の接触点位置や接触面形状(接触点の弾性変形形状)、摩擦係数の変化などを把握することが困難なため、実際の現象を数値解析モデルで十分に表現できない場合があります。特に、接触面形状については、わずか10mm程度の楕円に近い領域に30~60kN程度(普通乗用車3~6台分程度)の大荷重が加わるので測定することが非常に困難です。

本稿では、測定の困難な車輪とレール間の接触面形状を数値的に解析する取り組みについて紹介するとともに、その形状の違いが車両運動特性に与える影響について、運動力学的に考えてみます。

車輪とレールには・・・

鉄道車両の特徴の1つとして、運転士が直線でも曲線でもハンドル操作をすることなく、自分でレール上を滑らかに走行できることがあり、これは自動車と大きく異なる点です。

図1のように、1本の車軸に左右2枚の車輪を圧入したものを輪軸と呼びます。左右の車輪にはフランジと呼ばれるツバがあり、レールから外れずに転走するためのガイド

の役目をしています。また、車輪のレールと接する部分を車輪踏面と呼び、フランジ側が大きくなるように勾配が付けられています。輪軸がレール上を転走する時、車輪とレールの接触面には、ねばねばした領域とすべっている領域が共存しているため、輪軸は微小なすべりをもって転がっています。この接触面に生じる作用力をクリープ力と呼びます。クリープ力はすべりに比例して大きくなり、最大で鉄と鉄の摩擦力まで大きくなる特性があります。輪軸が左右に変位した時、車輪とレール間の接触点での車輪半径(車輪回転半径)が左右で異なります。しかし、2枚の車輪は一体で回転しますから、車輪とレール間には車輪回転半径の違いによるすべりが生じて矢印の向きにクリープ力が作用します。この力は、車輪回転半径の差がなくなる方向に作用するため、輪軸は自分で左右に蛇行しながらレール間中央に向かって転走します。つまり、輪軸がレールから外れることなく滑らかに転走できるのは、フランジのガイド効果とクリープ力によるおかげなのです。

一方、輪軸の転走速度が速くなると、車輪踏面の勾配により振動が収まり難くなる特性があります。輪軸が左右に連続して振動すると、ばね要素で結合した台車・車体も引きずられるので乗客が振動を感じます。さらに振動が大きくなると、軌道破壊や極端な場合には脱線にもつながります。

従って、走行安全性や乗り心地に優れた車両を開発する

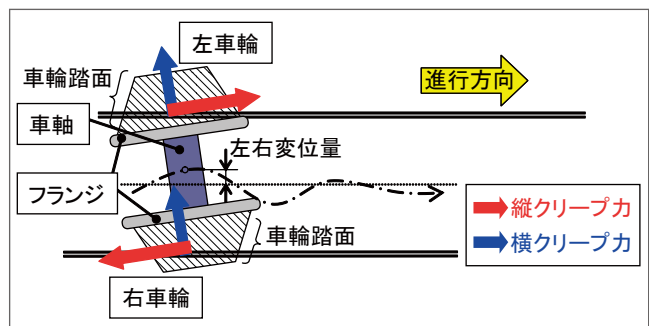


図1 輪軸に生じる接線力

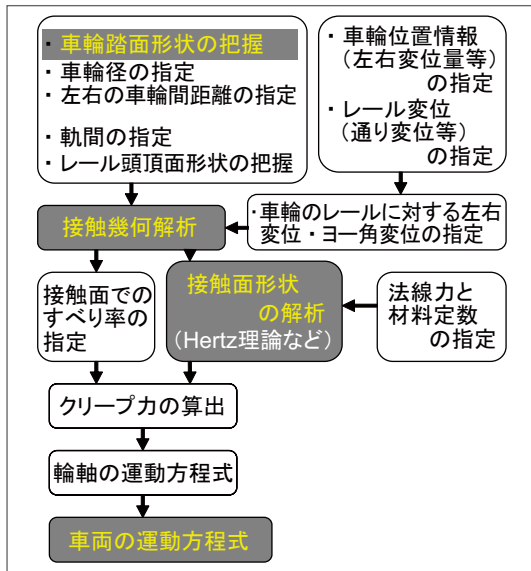


図2 車両運動解析の流れ

ためには、車輪とレール間に生じるクリープ力を正しく評価することが大切ということになります。

車輪とレール間の接触特性の推定

ここからは少し具体的な話として、実際の車輪とレール間のクリープ力を解析で推定するための方法について話をします。通常我々は、図2の流れに沿って実際の車輪とレール間のクリープ力を推定しています。ここでは、測定方法や解析手法に関係する黄色で示した項目について説明をします。

車輪踏面形状の把握

実際の車輪とレール間の接触特性を数値解析で推定する場合、最初に車輪踏面形状の測定を行います。図3(a)は、吉田式踏面形状測定器という計測器です。接触子(赤点線部)を手動で車輪踏面(車軸方向)になぞると、この接触子の動きに連動するペンが測定紙に形状を描写する仕組みです。この測定器は現場での調査などで使用されることが多いようですが、鉄道総研では、測定した記録紙をスキャナでパソコンに読み込み、専用開発したソフトで形状をデジタルデータに変換することで、後述する解析に使用した例があります。図3(b)は、ミニプルーフと呼ばれるデンマーク製の測定器です。形状の測定方法は吉田式踏面形状測定器と同様ですが、違いはデジタルデータとして自動的にパソコンに記録することができ、さらに、現場で設計形状などの他の形状と比較することで摩耗量などを計算できる点です。近年では、このミニプルーフ以外にも、同様の機能を有する測定器も販売されています。

接触幾何解析

接触幾何解析とは、一般的に車輪とレールは力を受けてもそれ自体は変形しないと仮定して、かつ両者の接触点が1点であるとした条件の下で接触点位置を計算で求める解

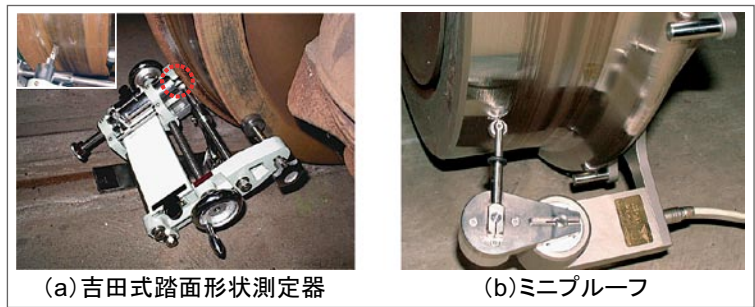


図3 車輪踏面測定器

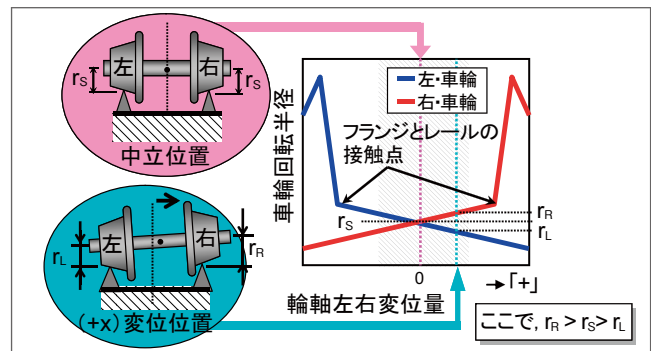


図4 接触幾何解析の模式図

析手法です。接触点位置がわかれば、その位置に対応する車輪径や接触角度などがわかります。車輪・レールの位置関係と接触幾何解析結果の関係を示す模式図を図4に示します。ここでは簡単のため、車輪踏面形状を円錐形状とし、レール断面形状を厚みのないナイフエッジ(ナイフの刃)と仮定します。

例えば、輪軸が中立位置にある場合、左右の車輪踏面形状とレール断面形状は中心線に対して左右対称となるので、左右の車輪とレールの接触点での車輪回転半径は同じ r_s となります。この位置関係での接触幾何解析結果は図4の右図では、桃色点線と青線・赤線が交差する位置となり同じ車輪回転半径 r_s となっています。同様に、輪軸が右側に(+x) mm動いた時、右側の車輪とレールの接触点はフランジ側へ移動するため車輪回転半径は大きくなり、逆に左側の接触点はフランジと逆方向に移動するため車輪回転半径は小さくなります。この位置関係での接触幾何解析結果は、図4の右図の水色点線と赤線・青線が交差する位置となり、左右の車輪回転半径は、それぞれ r_R と r_L になります。この要領で輪軸を左右に変位させると、それぞれの位置関係で図4のような解析結果が得られます。なお、円弧で構成された車輪踏面形状やレール形状の組合せで接触幾何解析を行うと、図4の直線部分が凹凸のある線になります。この解析結果は後述するすべり率の算出で使用します。また、簡易な手法として網掛部の範囲の計算結果を用いて、車両の走行安定性を定性的に判断する際に用いる等価路面勾配(= (左車輪回転半径 - 右車輪回転半径) ÷ (2 × 輪軸

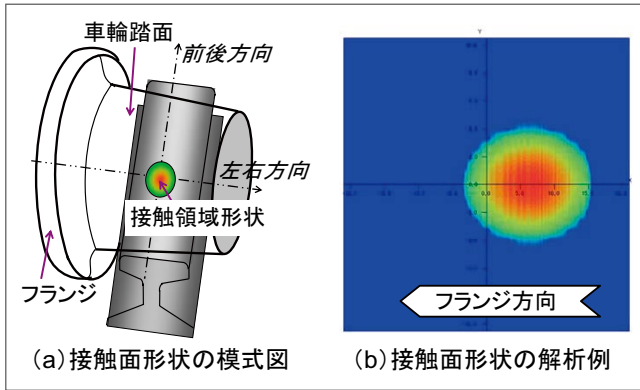


図5 車輪・レール間の接触面形状

左右変位量))という指標を求め、車両の異常振動が発生した時の原因究明に役立てることもあります。

なぜ、接触面形状???

一般的に車輪とレール間に働くクリープ力は、以下の式から求めることができます。

$$\text{クリープ力} = \text{クリープ係数} \times \text{すべり率}$$

すべり率は、車輪回転半径などの物理量を用いて計算します。一方、クリープ係数は車輪とレールの接触の仕方、特に両者の接触面形状と関係が深いことがわかっています。

一般的に、クリープ係数はHertz理論を適用して接触面形状を楕円形状と見なし、その長径・短径比に対応する値をKalkerの転がり接触理論(1967年発表)から求めます。Hertz理論とは、一定曲率の曲面を有する弾性体同士の接触面形状が楕円形状となり、その長径・短径、接触面に垂直に加わる圧力分布を求める方法のことです。図5(a)に接触面形状の模式図を示します。車輪とレールは前後、左右方向に複数の一定曲率の円弧で構成されていると考えることができます。このため、車輪とレールの接触面形状は接触点付近のそれぞれの曲率半径が一定であれば楕円形状となります。例えば、図5(b)は車輪踏面形状とレール形状が設計形状の条件で接触面形状を計算した結果で、楕円形状になっていることがわかります。解析結果は暖色になるほど接触圧が高いことを示しています。

このHertz理論は数学的に扱いやすいため広く用いられていますが、問題点もあります。これは、Hertz理論が一定曲率の曲面同士の接触条件でしか成立しない点です。例えば、車輪とレールの接触面内で円弧の曲率半径が変化すると、当然の事ながら、接触面形状は楕円形状にはなりません。このため、測定した車輪踏面形状を用いても、Hertz理論が成立しない事が多いので、クリープ係数は正確な値とはならず、車両運動解析の結果は誤差を持った値となります。そこで、実際の車輪とレール間の接触面形状をより詳しく知る必要がありました。前述のように、実物

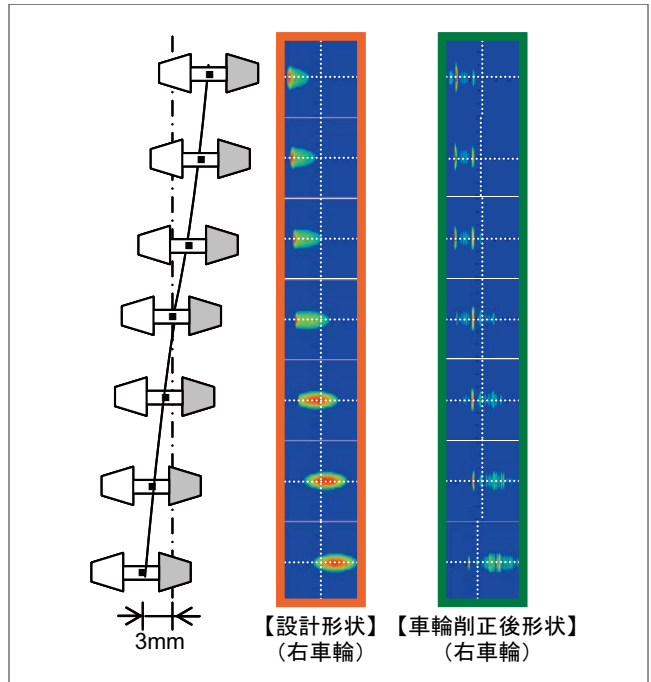


図6 車輪・レール間の接触位置と接触面形状

の車両で接触面形状を調べることは困難が多いのですが、三次元弾性論に基づく数値解析技術によりHertz理論よりも詳しく形状を推定する試みを行っています。この解析結果の妥当性については、実際の車輪とレール間の接触条件と同等にしたアクリル模型での実験や感圧紙を用いた簡易な接触面形状測定などで確認しています。

接触面形状の解析事例

実際に測定した車輪踏面形状とレール形状の組合せでは、どのような接触面形状となるのでしょうか？

車輪踏面形状が図面に載っているような滑らかな設計形状の場合と、車輪削正(車輪踏面を旋盤で元の設計形状に削る作業のこと)後に測定した微小な凹凸がある形状を用いて計算した接触面形状を比較します。図6は、輪軸が右側から左側へと動く時の、右車輪の接触点位置と接触面形状の関係を示した図です。左列(橙枠)が設計形状の場合、右列(緑枠)が車輪削正後の場合の接触面形状です。

両者の接触面形状は、外形寸法はほぼ等しいものの、車輪削正後に測定した形状では前後方向に筋が入っており、複数の細長い接触領域が集合した形態となっていることがわかります。この筋は、車輪削正の際に生じたバイト痕による微小凹凸の影響と考えられます。このように、実際の車輪とレールの接触面形状は、車輪踏面形状の微小な凹凸により、設計形状の接触面形状とは明らかに異なることがわかります。

次に、摩耗した車輪踏面ではどのように形状が変化するのでしょくか？走行距離ごとに解析した結果の一例を図7(a)～図7(d)に示します。走行距離が増加するにつ

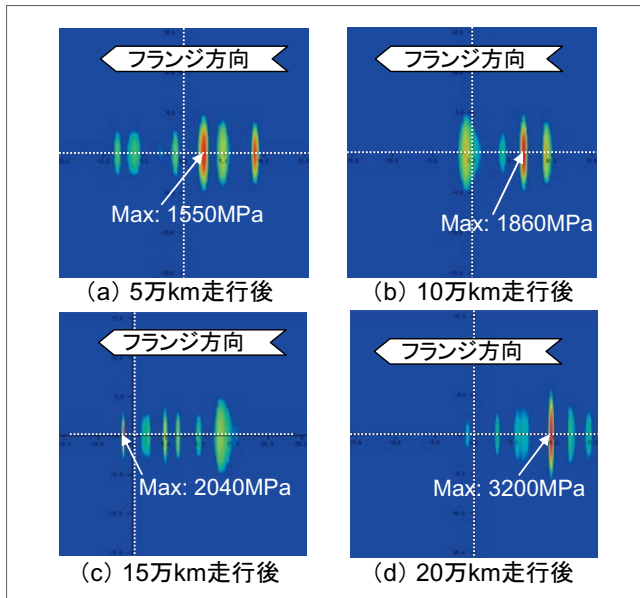


図7 走行距離ごとの接触面形状の変化(解析の場合)

れて、複数の細長い接触領域の大きさや相互の間隔、接触圧力が変化する様子がわかります。これは、クリープ力により車輪踏面が摩耗や変形した時に生じたうねりによるものです。

接触面形状と車両の運動

車両の運動に大きな影響を与えるクリープ係数は、接触面形状に関係が深いことを前にお話しました。では、接触幾何解析の結果が同じでもクリープ係数の値が異なると、車両の運動特性はどのように変化するのでしょうか？ここでは、速度を上昇させた時に発生する蛇行動について、これが現れる限界速度とクリープ係数の関係を車両運動解析(本稿では、正弦波3波の不整がある直線軌道上を車両が走行した時に発生する振動の過渡応答の収束性を確認した)で調べます。クリープ係数の条件は、理論的に求めたクリープ係数と、同じ車輪削正後の接触面形状に対して2種類の異なる仮定に基づく算出方法で求めたクリープ係数です。条件を以下に示します。

Type A … 設計形状にHertz理論を適用して楕円形状を計算し、長径・短径比から求めた理論的な値

Type B … 厳密に求めた接触面形状の外形寸法と等しい楕円形状から算出したクリープ係数

Type C … 厳密に求めた接触領域それぞれに生じる力の釣合を考慮して合成したクリープ係数

車両運動解析での車両モデル、設定条件は、いずれの条件も同じで、クリープ係数の値だけを変えて計算した結果を図8に示します。図8右の模式図に示した白色楕円形状は、それぞれの仮定に基づく接触面形状を表しています。

理論的なクリープ係数を使用したType Aでは蛇行動限

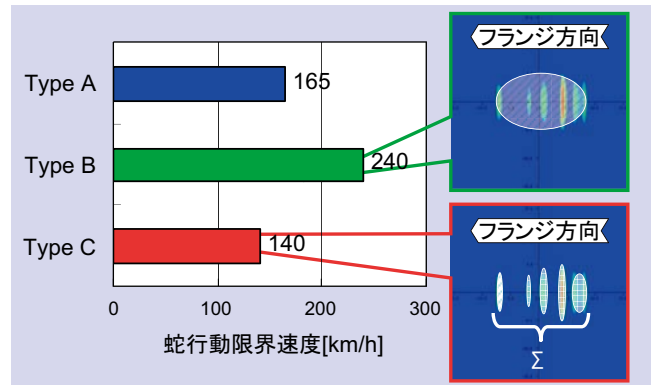


図8 クリープ係数の評価方法と蛇行動限界速度の関係

界速度が165km/hでした。一方、Type Cで計算すると140km/hとなり、Type Aより25km/h低く計算されます。さらに、Type Bで計算すると240km/hとなり、Type Aより75km/h高く計算されます。

このように、クリープ係数の評価方法によって推定される蛇行動限界速度が変わることが解析結果からわかります。ここで、室内実験での一例ですが、接触させた2個の小型円筒試験片を、すべり率一定の条件で回した時に接触面に生じるクリープ力を測定すると、接触面に微小凹凸がある場合とない場合では、クリープ力は前者の方が小さい結果が得られています。この実験結果は、すべり率が同じでも接触面形状が異なればクリープ力が異なることを示しており、解析結果とも定性的に一致しています。まだ限定的な条件での実験結果で、更なる検討が必要ですが、接触面形状を考慮することが車両の運動特性を精度良く把握するために大切である事は理解できます。

これまでの車両運動解析では、実際に測定した車輪踏面形状を用いる場合、接触面形状がきれいな楕円形状にならないことが多く正確なクリープ係数が不明なため、値に大差はないと仮定して理論的な値をそのまま用いる例が見られました。このため、鉄道総研では実態に即したクリープ係数を推定する事を目指し、接触面形状に着目した実験的な研究を進めています。この詳細は別の機会にご紹介したいと思います。

おわりに

車輪・レール間の解析手法に着目して概説しました。本稿では数値解析に着目した紹介をしましたが、当然ながら数値解析を有効なものとするには、調べたい現象を表現できる数値解析モデルを作成する必要があるため、実際の現象の把握が大前提となります。今後も引き続き、実際の車輪とレール間のクリープ力特性を実験的、解析的に把握し、台車特性も加味した走行性能に優れた車輪踏面形状の開発などに活かしていきたいと考えています。RRR